
Dispositif d'observation de la microstructure et de pesée des bétons au cours d'un chauffage

H. Carré*, J-C Mindeguia***, C. La Borderie*, P. Pimienta**

*Laboratoire des Sciences Appliquées au Génie Civil et Côtier (LaSAGeC²),
Allée du Parc Montaury, 64 600 ANGLET

**Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB), 84 avenue Jean Jaurès,
77 447 Marne la Vallée cedex 2

helene.carre@univ-pau.fr, jean-christophe.mindeguia@cstb.fr,
christian.laborderie@univ-pau.fr, pimienta@cstb.fr

RÉSUMÉ. Un dispositif expérimental permet de peser, d'observer (avec un grossissement moyen) des éprouvettes chauffées par une plaque chauffante. La température est mesurée en différents points grâce à des thermocouples. Différents matériaux cimentaires ont été étudiés : une pâte de ciment, un béton ordinaire et deux bétons à hautes performances (BHP). L'instabilité et l'incompatibilité microscopique des granulats silico-calcaires et de la pâte de ciment est mise en évidence. L'observation de béton contenant des fibres de polypropylène permet de mieux comprendre leur comportement au cours du chauffage.

ABSTRACT. An experimental apparatus allows weighing, observation (with a medium magnification) of samples heated with a hot plate. Several cementitious materials are studied: a cement paste, an ordinary concrete and two high performance concretes. The instability and the microstructural incompatibility between silico-calcareous aggregates and cement paste are shown. The observation of concretes containing polypropylene fibres allows a better knowledge of their behaviour during heating.

MOTS-CLÉS : béton, microstructure, observation, pesée, fibres de polypropylène

KEYWORDS: concrete, microstructure, observation, weighing, polypropylene fibres

1. Introduction

Le comportement des bétons à haute température reste encore une préoccupation importante au regard des instabilités observées au cours des incendies dans les structures en bétons ordinaires et plus particulièrement dans les bétons à hautes performances : écaillage, éclatement... (Harmaty, 1965). De nombreux travaux ont été menés afin d'expliquer ces phénomènes. Ils ont permis de mettre en évidence la superposition de différents facteurs : la faible porosité des bétons (Diederichs et al., 1995) (Hertz, 1998), les contraintes thermomécaniques dues aux gradients thermiques, les pressions internes dues à la présence d'eau (Hertz, 1998) (Bazant, 1978), les charges mécaniques (Jarhen, 1989), les déformations thermiques empêchées (Ulm et al., 1999), la différence de dilatation thermique entre la pâte de ciment et les granulats (Mounajed et al., 2004).

La connaissance du comportement microscopique des bétons à haute température est intéressante pour mettre en évidence les transformations physico-chimiques et observer l'influence des différents constituants du béton. Des observations au microscope électronique à balayage ont permis de montrer à une échelle très fine l'apparition des fissures dans la pâte, autour des granulats, les transformations des différents composants du béton en fonction de la température... Des observations récentes ont porté plus particulièrement sur le comportement des bétons comportant des fibres de propylène (Kalifa, 2001) (Noumowé, 2002). Ces derniers présentent un bon comportement à haute température, et moins d'instabilité. L'effet des fibres n'est pas encore très bien connu. Même si on sait que ces fibres fondent à 170°C, la création de canaux suffit-elle à expliquer leur influence ou une fissuration complémentaire participe-t-elle à leur action ?

2. Dispositif expérimental

Nous avons mis au point un dispositif d'observation des bétons à haute température. Celui-ci nous permet à la fois de chauffer l'échantillon, de le peser au cours du chauffage et de l'observer avec un grossissement moyen ($\times 5$ à $\times 20$). L'échantillon est suspendu à une balance, à 2 millimètres environ au-dessus de la plaque qui permet d'atteindre 500°C à sa surface. L'acquisition de la masse et des températures à la surface de la plaque et à 1 mm de la face supérieure de l'échantillon est réalisée en continu.

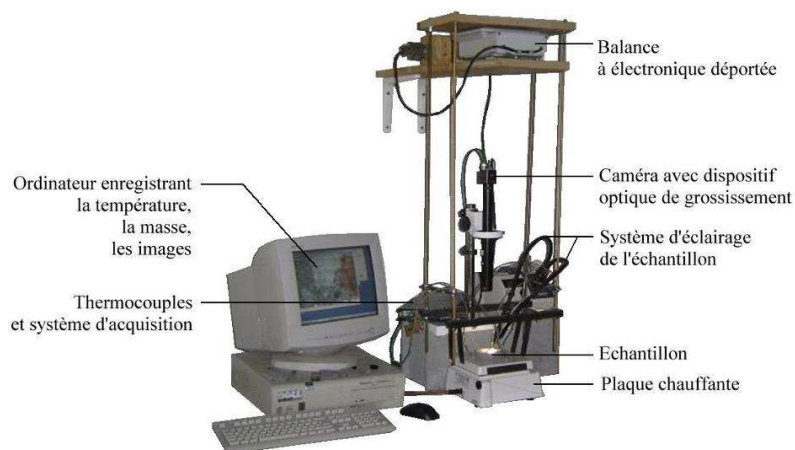


Figure 1. *Dispositif expérimental*

L'acquisition de l'image est réalisée en continu et des photos sont prises aussi souvent que nécessaire au cours de l'essai. Les échantillons testés sont des demi-disques de 6 à 8 mm d'épaisseur, et de 10 cm de diamètre.

3. Différents matériaux observés

Les matériaux étudiés sont une pâte de ciment (PA), un béton ordinaire (BO), un béton ordinaire avec fibres de polypropylène (BOF), un BHP avec granulats silico-calcaires (M75SC), un BHP avec granulats calcaires (M100C) et un BHP avec granulats calcaires et fibres de polypropylène (M100F) (cf. Tableau I).

Tableau I. Composition des matériaux testés

Matériau	Unité	PA	BO	BOF	M75SC	M100C	M100F
Granulat 1 ⁽¹⁾	kg					561	561
Granulat 2 ⁽²⁾	kg					488	488
Granulat 3 ⁽³⁾	kg				504		
Granulat 4 ⁽⁴⁾	kg				726		
Calcaire 8/12,5 de Chateaupanne	kg		330	323			
Calcaire 12,5/20 de Chateaupanne	kg		720	662			
Sable concassé du Boulonnais 0/5	kg					439	439
Sable silico-calcaire de Seine 0/4	kg					432	432
Sable de Bouaffles 0/5	kg				615		
Sable 0/2 de Chaze	kg		845	858			
Filler 0/100 Chateaupanne	kg			50			
Fumée de silice (Anglefort)	kg	26			45,1	37,8	41,6
CEM I 52,5 PM ES CP2 du Havre	kg	421			450	377	415
CEM II/A 42,5 R PM CP2	kg		350	350			
Superplastifiant 1 : résine GT	kg	3,2			12,25	12,5	12,5
Superplastifiant 2 : Cimfluid 2002	kg			1,28			
Superplastifiant 3 : Prelom 300	kg		3,5				
Adjuvant : Cimpacement	kg			0,16			
Retardateur : Chrystard	kg				3,1	2,6	
Fibres 1 ⁽⁵⁾	kg						1,75
Fibres 2 ⁽⁶⁾	kg			1,2			
Eau	kg	104	188	176	148,0	124,0	139
Résistance à 28 jours	MPa	81	45,4	50,5	92,2	112,8	96,8
Age des éprouvettes	mois	59		24	57	39	80

(1) Granulat 1 : granulat concassé calcaire du Boulonnais 12,5/20

(2) Granulat 2 : granulat concassé calcaire du Boulonnais 5/12,5

(3) Granulat 3 : granulat roulé silico-calcaire de la Brosse 12,5/25

(4) Granulat 4 : granulat roulé silico-calcaire de la Brosse 5/12,5

(5) Fibres 1 : polypropylène, fibrillées (Fibermesh) l = 19 mm - section = 50 x 150 μm^2

(6) Fibres 2 : fibres de polypropylène Fibrasol2P - l = 12 mm - $\varnothing$ = 50 μm

4. Etat thermo-mécanique du matériau en cours de chauffage

L'éprouvette présente un assez fort gradient thermique dans l'épaisseur au cours du chauffage. La figure 2 montre la température sur la plaque, en sous-face de l'éprouvette et en surface de l'éprouvette. La vitesse de montée en température lors des essais est de 45°C/min sur la face inférieure des éprouvettes jusqu'à 450°C.

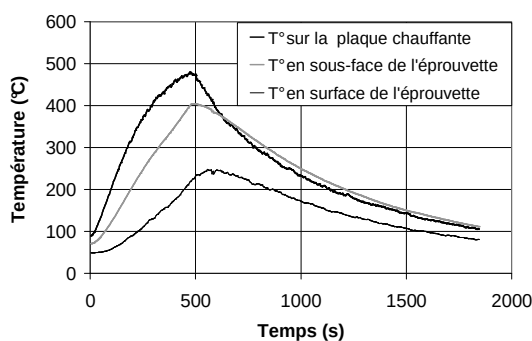


Figure 2 Températures lors d'un essai sur une éprouvette de M75SC

Au cours du chauffage, la pâte de ciment seule se dilate puis se contracte à partir de 150°C environ (en fonction de la vitesse de chauffage, Gaweska I, 2004) alors que les bétons se dilatent. Au-delà de 150°C, le gradient thermique dans l'épaisseur au cours du chauffage conduit pour la pâte à un état de contrainte macroscopique de compression en surface et de traction en sous-face (plus chaude) alors que les éprouvettes de béton sont tendues en surface et comprimées en sous-face.

5. Observation des différents matériaux au cours des chauffages

5.1. Influence de la nature des granulats

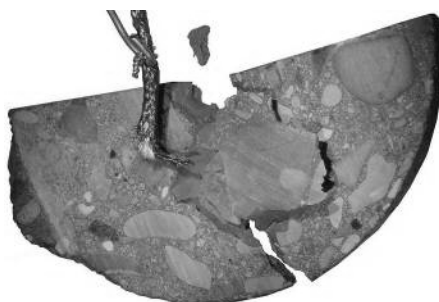


Figure 3 Eprouvette de M75SC présentant une instabilité en cours de chauffage

Les BHP M100C et M75SC sont fabriqués avec des granulats calcaires d'une part et silico-calcaires d'autre part. Au cours du chauffage, les éprouvettes de M75SC présentent une fissuration beaucoup plus importante que les éprouvettes de M100C. Une éprouvette de M75SC présentant un gros granulat de silex en partie centrale s'est coupée en plusieurs morceaux au cours du chauffage en raison du clivage du granulat (cf. Figure 2).

Les fissures dans les éprouvettes de M75SC sont principalement localisées à l'interface pâte-granulat (cf. Figure 4). Les fissures sont d'autant plus importantes que le chauffage est rapide (quelques essais à vitesse de chauffage plus faible nous ont permis de le mettre en évidence). Elles sont également plus nombreuses et plus ouvertes en sous-face (face de l'éprouvette proche de la plaque chauffante) bien que l'état macroscopique des contraintes ne puisse l'expliquer. Cependant, si on se place à l'échelle microscopique, on observe que la pâte se contracte et les granulats se dilatent. La dilatation des granulats silico-calcaires est particulièrement importante à partir de 400°C, température à partir de laquelle la dilatation du M75SC et du M100 se différencient nettement (comme le montrent les courbes de dilatation thermique de la Figure 5). Cette température est atteinte en sous-face et non en surface. Quelques essais arrêtés en deçà de cette température ont conduit à une fissuration beaucoup plus faible.

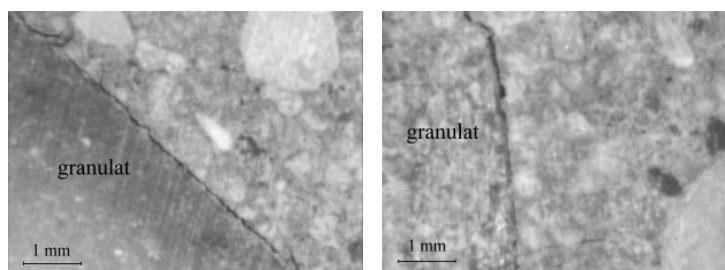


Figure 4 Fissures dans deux éprouvettes de M75SC

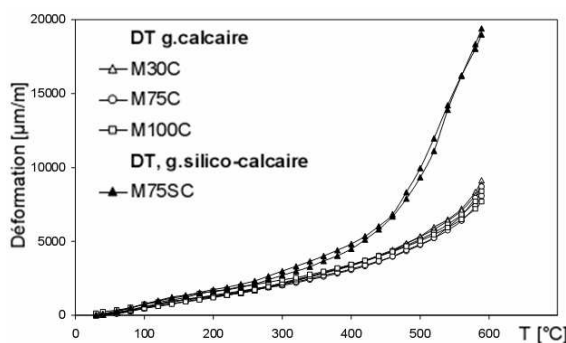


Figure 5 Dilatation thermique sur différents bétons (Gaweska I, 2004)

5.2. Influence des fibres

Le béton ordinaire fibré (BOF) contient des fibres de polypropylène de section circulaire, de 50 μm de diamètre et de 12 mm de longueur. Le BHP fibré (M100F) contient des fibres polypropylène de section rectangulaire (50 x 150 μm) et de 19 mm de longueur.

Les fibres de polypropylène fondent autour de 170°C puis se vaporisent à 340°C. En fondant les fibres présentent une augmentation de volume. La fonte des fibres est beaucoup plus visible dans le BHP M100F (cf. Figure 6) que dans le BOF (cf. Figure 6). En effet du liquide coule sur la surface de l'éprouvette (dans un mouvement de bas en haut) sans doute mu par l'augmentation de volume lors de la fusion et aux forces de capillarité. Dans le béton ordinaire, la porosité plus importante doit laisser pénétrer une grande partie de la fibre fondue et seule une petite partie est visible à la surface. Dans les BHP, la porosité fermée ne laisse pas pénétrer la fibre fondue. Dans la réalité, en milieu confiné, la fonte de la fibre doit donc entraîner des contraintes qui pourraient faciliter l'apparition d'une fissuration à partir des cavités contenant initialement les fibres.

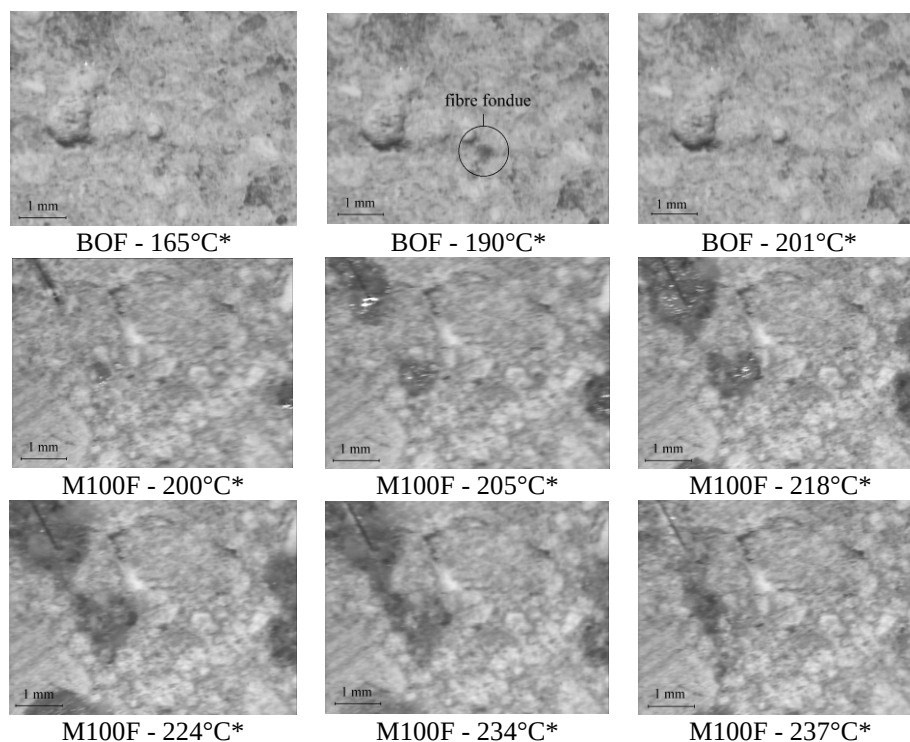


Figure 6 Eprouvette de BOF et de M100F à différents instants du chauffage
(*température à la surface de l'éprouvette)

Après refroidissement, l'observation de l'ensemble de la surface permet de mettre en évidence que, pour le M100F, beaucoup de fissures passent par un vide laissé par une fibre (cf. Figure 7). Des observations au MEB (microscope électronique à balayage) similaires ont été présentées dans Kalifa (2001). Les évidements laissés par les fibres constituent des points singuliers et facilitent le développement des fissures ou leur passage. Ainsi l'efficacité des fibres de polypropylène pour diminuer les contraintes internes conduisant aux instabilités serait liée à la fois aux canaux créés lors de leur évaporation à partir de 340°C °C, mais aussi au développement des fissures créant ainsi un réseau continu. Cela est beaucoup moins visible dans les éprouvettes de BOF.



Figure 7 Fissures dans des éprouvettes de M100F (observations après refroidissement)

8. Conclusion

Le dispositif mis au point permet de peser et d'observer des éprouvettes au cours du chauffage sur une plaque chauffante. Le grossissement moyen permet d'observer à la fois une interface pâte-granulat et une ou deux fibres à l'intérieur de la pâte. Les mesures de masse ne sont pas présentées dans ce document et pourront être présentées ultérieurement.

Les observations menées sur différents matériaux cimentaires nous ont permis de faire les observations suivantes :

- la forte différence de dilatation thermique entre pâte et granulats silico-calaires peut conduire à une fissuration importante des granulats, à des fissures à l'interface entre pâte et granulats. Ces phénomènes se produisent quand la température se situe autour de 400°C.
- lors de la fonte des fibres de polypropylène (autour de 170°C), un liquide apparaît en surface en quantité beaucoup plus importante dans le cas du BHP que dans cas du béton ordinaire. Cela est sans doute lié à la rétention d'une partie du liquide dans la pâte de ciment du béton ordinaire en raison de sa porosité beaucoup plus importante que pour les BHP.
- l'observation du BHP fibré après refroidissement nous montre que la plupart des fissures visibles dans les éprouvettes passent par les évidements laissés lors

de l'évaporation des fibres de polypropylène. Cela est beaucoup moins visible dans le cas du béton ordinaire.

D'autres essais pourront être réalisés pour compléter de manière intéressante cette étude. Ainsi, on pourra étudier l'influence des fibres de polypropylène sur l'évolution de la masse et de la température au cours du chauffage, l'influence de la forme des fibres sur la création des fissures, l'influence de la vitesse de montée en température...

7. Bibliographie

- Bažant Z.P. (1978), « Pore pressure and drying of concrete at high temperatures », J. Engng. Mech. Div., oct. 1978, 104, pp 1059-1079.
- Diederichs U., Jumppanen U. M., Schneider U. (1995), « High temperature properties and spalling behaviour of high strength concrete », Fourth International Workshop on High Performance Concrete - Characteristic Material Properties and Structural Performance, Weimar 5-6 octobre, 1995.
- Gaweska I., Comportement à haute température des bétons à haute performance - évolution des principales propriétés mécaniques, rapport de thèse de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, et de l'Ecole Polytechnique de Cracovie, soutenue le 05 novembre 2004
- Harmaty T.Z. (1965), Effect of moisture on the fire endurance of building element, National Research Council, Research paper n°270 of the division of building research, Ottawa 1965.
- Hertz K. (1998), Limit of spalling of fire exposed concrete, Department of Buildings and Energy Technical University of Denmark, nov. 1998.
- Jahren P.A. (1989), « Fire resistance of high strength/dense concrete with particular reference to the use of condensed silica fume » - A review. Proc. of Trondheim (Norway) 1989 Conference, pp 1013-1049.
- Kalifa P., Chéné G., Gallé C. (2001), « High-temperature behaviour of HPC with polypropylene fibres from spalling to microstructure », Cement and Concrete Research 31 (2001) pp 1487-1499.
- Mounajed G., Menou A., Boussa H., La Borderie C., Carré H., « Multi-scale approach of thermal damage : applications to concrete at high temperature », vol. 1 of International Conference on Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures, Vail Colorado, USA, p. 513-520, 2004.
- Noumowé A., Lefevre A., Duval R. (2002), « Porosité supplémentaire consécutive à la fusion de fibres de polypropylène dans un béton à hautes performances », Revue Française de Génie Civil, volume 6 - n°2/2002, pp 301-313.
- Ulm F.J., Coussy O., Bažant Z.P. (1999), The Chunnel, Fire 1 : « Chemoplastic softening in rapidly heated concrete », Journal of Engineering Mechanics, March 1999, pp 272-282.